

⑯ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES

PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift
⑪ DE 3931970 A1

⑯ Int. Cl. 5:
H 01 J 37/147
H 01 J 37/26

DE 3931970 A1

⑯ Aktenzeichen: P 39 31 970.9
⑯ Anmeldetag: 25. 9. 89
⑯ Offenlegungstag: 4. 4. 91

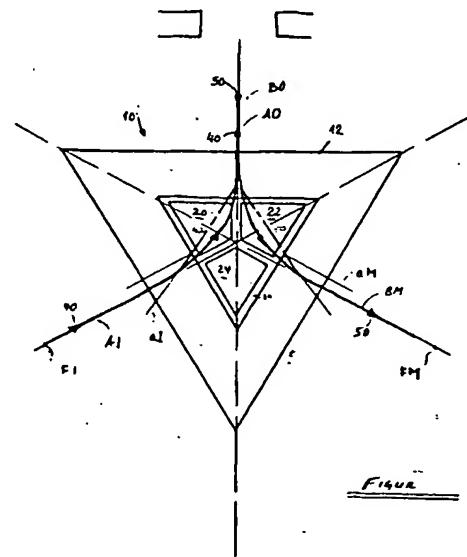
⑰ Anmelder:
Röthele, Stephan, 3392 Clausthal-Zellerfeld, DE

⑰ Vertreter:
Wuesthoff, F., Dr.-Ing.; Frhr. von Pechmann, E.,
Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.; Behrens, D., Dr.-Ing.; Goetz,
R., Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing.; Hellfeld von, A.,
Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Anwälte; Würtenberger,
G., Rechtsanw., 8000 München

⑰ Erfinder:
Veneklasen, Lee, Castro Valley, Calif., US

⑯ Sektorfeldablenksystem, insbes. für ein Niederspannungselektronen-Mikroskop

Ein Sektorfeldablenksystem, insbes. für ein Niederspannungselektronen-Mikroskop weist einen gleichförmig erregbaren äußeren Polschuh (12) auf, der zwei oder mehrere identisch gestaltete innere, ebenfalls zu erregende Polschuhe (20, 22, 24) umschließt, deren Erregung sich von der Erregung des äußeren Polschuhs unterscheidet und eine stigmatische Doppelfokussierung liefert.



DE 3931970 A1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Sektorfeldablenksystem mit drei oder mehr Magnetsektoren bzw. -Schuhen, insbes. ein für Niederspannungselektronen-Mikroskop aber auch für Spektrometer oder dergl., welches mittels elastischer oder inelastisch gestreuter Elektronen oder Ionen abbildet. Es ist ferner geeignet für bestimmte Formen von Ablenkeinrichtungen zum Studium von Teilchenegenschaften. Ein Niederspannungselektronenmikroskop, bei dem die Erfindung eingesetzt werden kann, ist von E. Bauer im Jahre 1962 angegeben worden. Ein Spektrometer, für das das neue Sektorfeldablenksystem geeignet ist, ist vom Castaing-Henry-Typ.

Niederspannungselektronen-Mikroskope (Low Energy Electron Microscopes (LEEM)) beleuchten die zu untersuchende Oberfläche mit parallelen Elektronenstrahlen, die durch eine Objektivlinse, insbes. eine Objektivkathodenlinse kollimiert werden, die so ausgerichtet ist, daß deren Achse rechtwinkelig zur zu untersuchenden Probe steht. Längs der Beleuchtungssachse reflektierte Elektronen werden wieder beschleunigt und fokussiert und dienen zur Erzeugung eines Abbildes der Struktur, Topologie und/oder der chemischen Eigenschaften der beobachteten Oberfläche. Derartige Elektronen-Mikroskope haben eine sogenannte magnetische Sektorablenkeinheit (Separator), die es gestattet, ein Beleuchtungsstrahlenbündel auf einer Seite der Ablenkeinheit einzuleiten und in die Achse der Objektivlinse bzw. Kathodenlinse abzulenken. Das reflektierte Ablenkungsstrahlenbündel verläuft entlang der gleichen Achse der Kathodenlinse, wird aber aufgrund des Umstandes, daß die Elektronengeschwindigkeit reversiert wurde, in der Ablenkeinheit aus der Beleuchtungssachse weg in die Achse eines Abbildungssystems mit Verstärkungslinsen und dergl. gelenkt, das das Abbild der beobachteten Oberfläche erzeugt. Ein wesentliches Merkmal dieses Ablenksystems ist es, daß die zur Beleuchtung und Abbildung dienenden optischen Einheiten räumlich getrennt sein können und so ein sonst nicht lösbares Problem der Beleuchtung und Abbildung vermeide.

Für eine optimale Betriebsweise sollte die Ablenkeinheit verschiedene bestimmte Eigenschaften aufweisen. Wenn alle Linsensysteme fixiert sind, muß sichergestellt sein, daß die Mittelachse sowohl des Beleuchtungs- als auch des Abbildungsstrahlengangs bestimmten genau festgelegten Wegen außerhalb des Bereichs der Sektorablenkeinheit folgen, und dadurch zu erreichen, daß die beiden Strahlenbündel der Objektivlinse der Optik längs der gleichen Achse in die Ablenkeinheit ein- und austreten. Das Ablenksystem muß ferner ein fokussiertes Abbild der Elektronenstrahlquelle auf einen Punkt gerade oberhalb der Objektivkathodenlinse abbilden und es muß ferner ein fokussiertes Abbild auf einen symmetrisch angeordneten Punkt längs des Abbildungsstrahlengangs durchlassen. Zur Vermeidung von Verzerrung und Astigmatismus ist es ferner wünschenswert, daß das Sektorfeldablenksystem stigmatisch oder doppelbrechend ist. Das bedeutet, daß es einen Punkt oberhalb des Objektivs in einen anderen Punkt außerhalb der Ablenkeinheit fokussiert, unabhängig davon, ob sich die Elektronen längs der horizontalen oder vertikalen Ebene der Polschuhe der magnetischen Ablenkeinheit bewegen. Ferner sollte die Sektorablenkeinheit in der Lage sein, die zuvor genannten Erfordernisse auch dann zu erfüllen, wenn Beleuchtungsstrahlenbündel und Abbildungsstrahlenbündel unterschiedliche Energien haben. Diese zuletzt genannte Eigenschaft ist vor

allen Dingen wichtig, wenn inelastische Elektronen, nämlich solche, die Energie an die zu untersuchende Probe verlieren, zur Abbildung verwendet werden.

Sektorablenkeinheiten umfassen bisher einen einzigen festen Polschuh, der so geformt ist, daß die gewünschte Ablenkung erzielt wird. Der Krümmungsradius der abgelenkten Strahlenbündel und deren Neigung gegenüber den Randgrenzen der Magnetsektoren bestimmen die Eigenschaften der Sektorablenkeinheit. Es sind auch Ausführungsformen bekannt, bei denen in einem einzigen Polschuh ausgeschnittene Bereiche vorgesehen sind, um den erwünschten Strahlengang zu erzielen. Um Symmetrie zwischen dem auftreffenden Beleuchtungsstrahlenbündel und dem austretenden Abbildungsstrahlenbündel sicherzustellen, müssen alle drei äußeren Kanten rechtwinkelig zu den Strahlenbündelachsen außerhalb der Ablenkeinheit stehen, während die Innenflächen eines einzelnen Polschuhs prinzipiell derart ausgebildet sein können, daß eine symmetrische, stigmatische Abbildung erzeugt wird. Unabhängig davon, wie vorteilhaft sich die bekannten Ablenkeinheiten betreiben lassen, darf nicht übersehen werden, daß derartige einteilige Polschuhausbildungen grundsätzlich nicht in der Lage sind, eine Vielzahl unterschiedlicher Abbildungsstrahlenbündelenergien zu beherrschen, während nur ein Beleuchtungsstrahlenbündel mit einer einzigen bestimmten Energie zur Anwendung kommt. Das eine oder andere Strahlenbündel muß sich von der gewünschten an sich festgelegten Strahlengangachse entfernen, da unterschiedliche Energien zu unterschiedlichen Krümmungsradien im gleichen Magnetfeld führen. Wenn es auch theoretisch möglich ist, eine Reihe von entsprechend geformten Ablenkeinheiten mit mehreren Symmetrieeachsen zur Erzielung des gewünschten stigmatischen und nicht-dispersiven Abbildungsverhaltens zu verwenden, würden derartige Ablenksysteme außerordentlich kompliziert werden. Solche Systeme mit symmetrisch gekrümmten Ein- und Ausfallachsen gehören zum Stand der Technik.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Sektorfeldablenksystem zu schaffen, daß die an es gestellten, zuvorgenannten Anforderungen bei vergleichsweise einfacherem Aufbau erfüllt und sich auch bei inelastisch gestreuten Elektronen oder sich energetisch unterscheidenden Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlenbündeln dennoch stigmatisch doppelfokussierend verhält. Schließlich soll das Ablenksystem sowohl mit elastischen als auch inelastisch gestreuten Elektronen oder Ionen betrieben werden können.

Ein diese Aufgabe lösendes Sektorfeldablenksystem ist mit Ausgestaltungen in den Patentansprüchen gekennzeichnet und anhand eines Ausführungsbeispiels näher erläutert.

Das Sektorfeldablenk-System gemäß der Erfindung hat einen gleichförmig erregten äußeren Polschuh, der zwei oder mehr identisch gestaltete, symmetrisch angeordnete innere Polschuhe umschließt, die durch ein Feld erregt werden, das sich von dem äußeren Erregungsfeld unterscheidet, und eine stigmatische Doppelfokussierung liefert. Die Ablenkeinheit bildet mit elastischen oder inelastischen gestreuten Elektronen oder Ionen ab. Der äußere Polschuh bzw. das äußere Polstück wird gleichmäßig erregt.

Eine Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, daß wenigstens einer der Polschuhe gegenüber den anderen unterschiedlich erregt werden kann, um Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlenbündel zu erhalten, die außerhalb des Ablenksystems spiegelbildlich sind, auch wenn

das Beleuchtungsstrahlenbündel und das Abbildungsstrahlenbündel unterschiedliche Energien haben.

Bei einer anderen Ausgestaltung des erfundungsgemäßen Sektorfeldablenksystems ist ein innerer Polschuh mit unterschiedlicher Stärke gegenüber den anderen inneren Polschuhen erregbar. Es kann jedoch auf einem inneren Polschuh auch eine zusätzliche Spule vorgesehen sein, die bei Erregung eine entgegengerichtete Feldkomponente erzeugt. In beiden Fällen führt dies zu einer quadropolen Fokussierung längs einer einzigen Achse oder längs beider Achsen.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfahrung ist anhand einer Zeichnung näher erläutert, die eine Sektorfeldablenkeinheit im Querschnitt zeigt.

Ein Sektorfeldablenksystem 10 umfaßt einen dreieckförmigen äußeren Polschuh 12 mit einer mittigen dreieckigen Durchgangsoffnung und in dieser — gemäß der Erfahrung — symmetrisch angeordnet drei innere gleichgeformte Polschuhe 20, 22 und 24, die durch einen Luftpalt 26 vom äußeren Polschuh getrennt sind und einen Ablenkinkel von 60° erzeugen. Der äußere dreieckförmige Polschuh 12 umschließt also sowohl die inneren Polstücke 20, 22 und 24 als auch die im Querschnitt dreieckförmige dreifach-symmetrische Anordnung der inneren Polschuhe. Der äußere Polschuh 12 wirkt mit einem gleichförmigen Magnetfeld auf die Beleuchtungsstrahlenbündelsegmente AI und AO und auf die Abbildungsstrahlengangsegmente BO und BM. Die Strahlenbündelsegmente AI und BM müssen entlang dem gleichen spiegelsymmetrischen Strahlengang verlaufen, während die Strahlenbündelsegmente AO und BO außerhalb des Ablenksystems 10 überlagert sind. Die inneren Polschuhe 20, 22 und 24 sind identisch geformt, so daß sie innerhalb des äußeren Polstücks 12 zueinander passen. Die inneren Kanten sind so ausgerichtet, daß sie längs jeder Strahlenachse ausgerichtet sind. Die inneren und äußeren Kanten des äußeren Polschuhs 12 verlaufen parallel miteinander und senkrecht zur außenliegenden Strahlenachse. Dies ist aber keine notwendige Anordnung der inneren Kanten der inneren Polschuhe 20, 22 und 24. Letztere können unabhängig voneinander durch getrennte Erregerspulen erregt werden, um beliebige Felder längs einer rechtwinklig zu einer Achse zu erzeugen, die rechtwinklig zum Zeichenblatt steht. Es wird angenommen, daß die einander zugewandten Polstückpaare, die den Ablenkungspalt der inneren Polstücke bestimmen, mit einer kleinen Komponente eines entgegengerichteten Feldes erregt werden können, so daß auch eine schwache Quadropollinse gebildet werden kann. Diese Quadropolkomponenten dienen zur Korrektur residenten Astigmatismus und zwar getrennt für den Beleuchtungs- und den Abbildungsstrahl.

Die nachfolgende Ausführungsform verdeutlicht, daß es möglich ist, daß System doppelfokussierend bzw. stigmatisch zu machen, selbst wenn die exakten Eigenschaften nicht zuvor errechnet werden können. Die Literatur zeigt, daß die Fokussiereigenschaften jeder Sektorfeldablenkeinheit vom Krümmungsradius des Strahls (Erregung) und der Neigung der Strahlachse al und aM gegenüber der Grenze jedes Sektors beim Ein- und Austritt des Sektors abhängt. Wenn nur das äußere Polstück 12 erregt wird und dessen innere und äußere Kanten parallel zueinander verlaufen, dann ist in der Literatur ausgeführt, daß das System außerhalb der Achse verlaufende Elektronenstrahlen in vertikaler Richtung aber nicht in horizontaler Richtung fokussieren wird (Fraktion). Wenn jedoch nur die inneren Polschuhe alle gleich

erregt werden, treten alle zentralen Strahlen rechtwinklig zu den aktiven Polschuhgrenzen ein und aus. In der Literatur ist ausgeführt, daß das System dann in der horizontalen Ebene fokussieren wird aber nicht in der vertikalen Ebene.

In beiden Fällen verlaufen die Strahlengänge der längs der Achse verlaufenden Elektronenstrahlen AI, AO, BO, BI identisch zueinander, selbst wenn sie davon abhängen, welcher Polschuh erregt ist. Wenn sowohl der äußere Polschuh 12 als auch die inneren Polschuhe 20, 22, 24 erregt sind, erfolgt eine Fokussierung sowohl in der horizontalen Ebene als auch in der vertikalen Ebene und die Symmetrie der Strahlengangsegmente ist gesichert. Daraus folgt, daß eine stigmatische Fokussierung erzielbar ist. Wenn ein Objektpunkt FI korrekt angeordnet ist, werden seine konjugierten Bildpunkte FO und FM mit einem Vergrößerungsfaktor von minus 1 (-1) stigmatisch abgebildet. Mit anderen Worten, differentielle Erregung der inneren Polschuhe und des äußeren Polschuhs hat die Wirkung einer Änderung der effektiven Fokussierstärke der inneren Polschuhgrenzen derart, daß eine Fokussierung sichergestellt ist. Aufgrund der internen Symmetrie des Beleuchtungs- und des Abbildungsstrahlenbündels ist sichergestellt, daß die von chromatischer Aberration freien Punkten in der Mitte des Systems liegen, nämlich dort, wohin die Probe abgebildet wird.

Aus dem Vorhergehenden ergibt sich, daß das magnetische Sektorfeldablenksystem 10 grundsätzlich doppelfokussierend für eine einzige nominale Strahlenenergie ist. Wenn sich jedoch die Energie des Abbildungsstrahlenbündels AI—AO vom Beleuchtungsstrahlenbündel BO—BM unterscheidet, kann z.B. der innere Polschuh 22 etwas abweichend erregt werden, um ihn wieder zur gewünschten Austrittsachse zu drängen. Während sich die Form des Strahlengangs ändert (für geringere Energien wird er im äußeren Polstück stärker gekrümmt und für entsprechend gerader im inneren Polschuh) stellt die Symmetrie der Strahlengänge BO nach BM sicher, daß er längs der Abbildungsachse austritt. Es kann gezeigt werden, daß die Abbildungsbedingungen sich etwas ändern und ein geringer Astigmatismus auftritt, da das Verhältnis von innerer zu äußerer Erregung verschieden ist. Diese Abweichung kann durch die eingebaute, zuvor erläuterte Quadropolanordnung korrigiert werden. Für kleine Energiedifferenzen ist die Wirkung auf den Bildastigmatismus vernachlässigbar, wenn er an den achromatischen Punkten liegt.

Die Symmetrie der Anordnung kann eine 3-, 4- oder 5-fache sein.

Bei einem praktischen Ausführungsbeispiel des Sektorfeldablenksystems der Erfahrung betrug die äußere Kantenlänge des äußeren dreieckförmigen Polschuhs 12 150 mm, die Feldstärke der Polschuhe je 100 Ampère-Windungen (Gauss), die Brennweite (Abstand der Bildpunkte FI und FM) vom Mittelpunkt 200 mm, und lag FI symmetrisch zu FM.

Bei unterschiedlicher Erregung des Beleuchtungsstrahls BO—BM und des Abbildungsstrahls AI—AO ändert sich die Feldstärke proportional der Quadratwurzel der Energiedifferenz. Dazu kann die Erregungsstromstärke unterschiedlich sein oder es ist eine zusätzliche Spule auf dem einen Polschuh vorgesehen. Die Brennweite ändert sich bei geringen Erregungsdifferenzen nur geringfügig. Leichter Astigmatismus kann auftreten.

Die in der Zeichnung dargestellte 4-Magnet-Ausführung (die Magnete sind vornehmlich Elektromagnete, wenn auch Permanentmagnete verwendbar sind) erzeu-

gen gemeinsam zwei entgegengerichtete Felder, die einen Sattel der Feldstärkenverteilung in der Mitte bilden.

Die Magnete bestehen aus Eisen hoher Permeabilität und geringer Remanenz. Abmessungen des äußeren Polschuhs von ca. 75 bis 150 mm kommen in Betracht. Zur Stromversorgung dient ein stromgeregeltes Netzgerät.

Patentansprüche

10

1. Sektorfeldablenksystem mit drei oder mehr Magnetsektoren bzw. -Schuhen, insbesondere für ein Niederspannungselektronen-Mikroskop, welches mittels elastischer oder inelastisch gestreuter Elektronen oder Ionen abbildet, gekennzeichnet durch einen gleichförmig erregten äußeren Polschuh (12), der zwei oder mehrere identisch gestaltete innere, ebenfalls erregte Polschuhe (20, 22, 24) umschließt, deren Erregung sich von der äußeren Erregung unterscheidet und eine stigmatische Doppelfokussierung liefert.

2. Sektorfeldablenksystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens einer der Polschuhe unterschiedlich gegenüber den anderen Polschuhen derart erregbar ist, daß das Beleuchtungs- und das Abbildungsstrahlenbündel außerhalb des Ablenksystems spiegelbildlich verlaufen, auch wenn die Energie des Beleuchtungsstrahlenbündels unterschiedlich von der Energie des Abbildungsstrahlenbündels ist.

3. Sektorfeldablenksystem nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch einen gegenüber den anderen inneren Polschuhen unterschiedlich erregbaren inneren Polschuh oder eine zusätzliche Magnetspule auf einem der inneren Polschuhe, welche eine entgegengerichtete Feldkomponente erzeugt, die zu einer Quadropol-Fokussierung in einer der Achsen oder in beiden Achsen führt.

4. Sektorfeldablenksystem nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der äußere Polschuh (12) die Form eines gleichschenkeligen Dreiecks hat und die inneren Polschuhe (20, 22, 24) unter Belassung eines Spaltes (26) eine symmetrische Anordnung bildend umschließen.

30

35

40

45

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

50

55

60

65

0238-223-014

0238-223-102

0238-223-103

Offenlegungsdatum

4. April 1991

